

УДК 629.788:523.43

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

**Комков В.А., Кокорева О.Г., Курсаков А.В.\***

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

*\* e-mail: alexey-kursakov@mail.ru*

---

Представлены результаты исследования технологии упрочнения высоконагруженных поверхностей тонкостенных элементов летательных аппаратов методом поверхностной пластической деформации (ППД). В несущих частях летательных аппаратов (ЛА) это нервюры, в ненесущих частях — шпангоуты. Продольные элементы, подкрепляющие сравнительно слабоизогнутую обшивку несущих и ненесущих частей ЛА, — это стрингеры. Рассмотрено влияние режимов упрочнения на характеристики качества поверхностного слоя. Проведены исследования физико-механических свойств поверхностного слоя металла при упрочнении ППД. Определена глубина упрочненного слоя при оптимальных режимах обработки поверхности методом ППД. Установлена взаимосвязь характеристик качества поверхностного слоя с выносливостью и долговечностью деталей машин, выполнена их количественная оценка

*Ключевые слова:* высоконагруженные поверхности элементов ЛА, динамические нагрузки, микроструктура, дислокации, упрочнение, характеристики качества поверхностного слоя, пластическая поверхностная деформация, остаточные напряжения, долговечность.

---

Увеличение прочностных характеристик ЛА без увеличения веса в настоящее время является актуальной проблемой, решение которой даст возможность значительно повысить срок межремонтных работ и увеличить общее время эксплуатации ЛА. Это повысит рентабельность грузовых и пассажирских перевозок при сохранении надежности и эксплуатации ЛА, что будет способствовать безопасности полетов.

Современные технологические методы упрочнения в целях повышения надежности и долговечно-

сти деталей ЛА, подвергающихся значительным динамическим нагрузкам, позволяют не увеличивать расход металлов и не требуют капитальных затрат на внедрение новой технологии.

Известно, что большинство деталей машин разрушается в результате приложения циклических нагрузок и только небольшая часть — от действия однократной нагрузки. Поэтому стойкость материалов к циклическим нагрузкам является наиболее важным фактором в проблеме повышения надежности и долговечности деталей машин [3].

Циклическая прочность и долговечность деталей машин существенно зависят от технологии их изготовления. Механическая обработка резанием является одной из основных и, как правило, завершающих технологических операций при изготовлении деталей машин.

Вопрос о влиянии механической обработки резанием на циклическую прочность и долговечность изделий сложен и недостаточно изучен. В процессе механической обработки резанием измеряются физико-механические свойства поверхностного слоя деталей. Вследствие силового воздействия режущего инструмента пластически деформируется (наклёпывается) приповерхностный слой металла. Нагрев металла и фазовые превращения, всегда сопровождающие обработку резанием, обуславливают проникновение в приповерхностном слое остаточных напряжений [1]. В процессе резания изменяется микрогеометрия обрабатываемой поверхности и появляются неровности, вызывающие концентрацию напряжений около впадин. Именно в этом заключается физический смысл влияния механической обработки деталей машин резанием на их циклическую прочность и долговечность.

Очевидно, изменение циклической прочности и долговечности зависит от совместного действия и наклепа, и остаточных напряжений, и микрогеометрии поверхности. Вместе с тем, с практической точки зрения, необходимо знать, какой из указанных факторов оказывает определяющее влияние на циклическую прочность. Это позволит назначить рациональные режимы обработки резанием.

Прочность металлов, применяемых для изготовления деталей ЛА, можно значительно повысить путем применения соответствующей технологии упрочнения при изготовлении. Весьма эффективным методом упрочнения в настоящее время является наклеп несущих поверхностей, создаваемый с помощью упрочняющих инструментов и приспособлений при определенных режимах [3].

Пластическое деформирование металла с целью создания наклепа на несущих поверхностях деталей сопровождается сложными физико-механическими явлениями, которые вызывают:

- 1) изменение формы и величины кристаллитов (дробление зерен на блоки) и образование субмикроструктуры с увеличенным количеством дислокаций [2] при благоприятном тормозящем друг друга расположении;

- 2) изменение ориентировки зерен с переводом их из беспорядочного расположения в упорядоченное, создавая анизотропию механических и физических свойств наклепанного слоя;

- 3) накопление связанной потенциальной энергии и образование остаточных напряжений в макро-, микро- и субмикрообъемах;

- 4) накопление внутрикристаллитных и межкристаллитных нарушений сплошности.

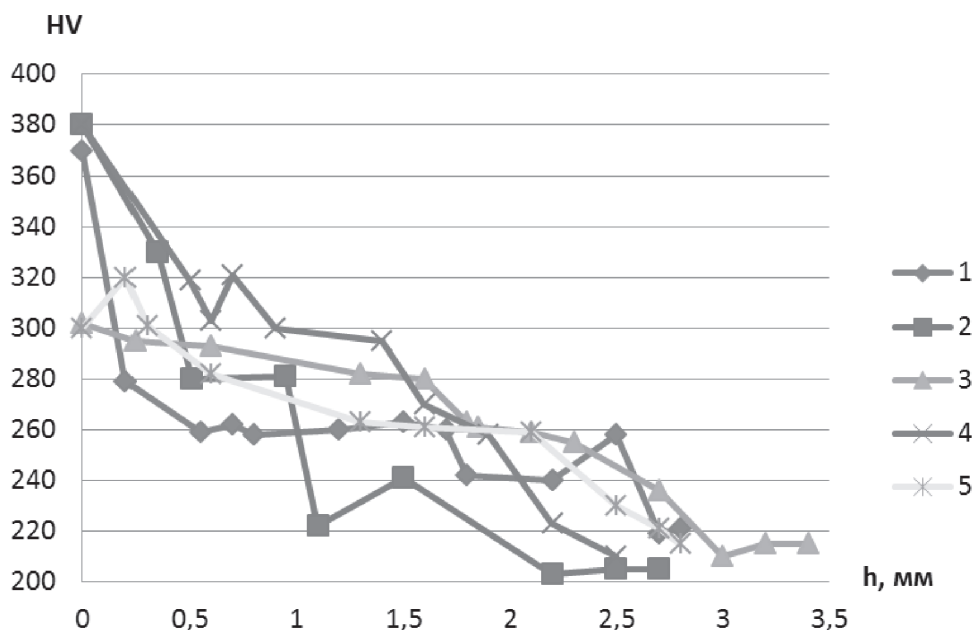
Явления, вызывающие изменения, названные в первых трех пунктах, являются благоприятными, так как приводят к увеличению твердости, предела прочности, предела упругости упрочненного слоя металла и вызывают повышение выносливости деталей в 1,5—2 раза. Явления, вызывающие изменения, названные в четвертом пункте, неблагоприятные. Возникая одновременно с благоприятными, они могут препятствовать использованию прочностного резерва, а в отдельных случаях, когда создается перенаклепанный слой, могут привести к снижению выносливости. Поэтому, несмотря на известные теоретические сведения о результатах пластической деформации, приводящей к упрочнению, получение конкретных значений рационального наклепа требует экспериментальных исследований технологии процесса пластического деформирования с разработкой соответствующих приспособлений, оборудования, инструмента и режимов упрочняющей обработки.

Проведены исследования и получены положительные результаты, позволяющие внедрять в производство методы упрочнения пластическим деформированием целого ряда различных ответственных деталей. Исследования включали в себя опытные упрочнения деталей при различных режимах в лабораторных условиях с испытанием на стендах и машинах с пульсатором для сравнения выносливости этих деталей, а также непосредственно в условиях производства с проведением соответствующих эксплуатационных сравнительных испытаний долговечности.

В лабораторных испытаниях после проведения упрочнения специальным упрочняющим инструментом было исследовано качество упрочненного слоя металла зубьев по эвольвентным поверхностям и по впадинам зубьев. На образцах, вырезанных из упрочненных и неупрочненных натуральных зубчатых колес, определялись глубина упрочненного слоя и его степень, остаточные напряжения I и II рода и дисперсность структуры (величина блоков, на которые дробились кристаллиты) при различных режимах пластического деформирования рабочих поверхностей зубьев.

Результаты исследования физико-механических свойств поверхностного слоя металла, упрочненного при основных вариантах режима пластического деформирования, показывают, что твердость боко-

вых поверхностей зуба по сравнению с исходной повышается с 215 до 310–386 HV, т. е. на 48–78%. Глубина упрочнения  $h$  на каждой стороне зуба получается от 2,49 до 3,55 мм, а во впадине — несколько больше, в зависимости от режима [4]. На рисунке приведены зависимости, характеризующие изменение твердости металла и глубины упрочненного слоя для основных вариантов режима.



Изменение твердости и глубины упрочнения при различных режимах упрочнения: 1 —  $k=2$ ;  $v=4,2$  мм/м;  $s=1,35$  мм; 2 —  $k=18$ ;  $v=4,2$  мм/м;  $s=1,67$  мм; 3 —  $k=16$ ;  $v=14,2$  мм/м;  $s=1,45$  мм; 4 —  $k=10$ ;  $v=7,8$  мм/м;  $s=1,67$  мм; 5 —  $k=28$ ;  $v=1,8$  мм/м;  $s=2,26$  мм

Как видно из приведенных данных, все варианты режима упрочнения дали возможность получить достаточный диапазон упрочнения, из которого можно выбрать оптимальные значения, обеспечивающие наибольшее повышение выносливости зубьев.

В отдельных случаях при большом количестве проходов может появляться перенаклеп, в результате которого на некоторой глубине от поверхности появляются микронарушения сплошности структуры, которые впоследствии могут перейти в макротрещины, вызывающие ослабление выносливости металла.

Важным фактором в режиме процесса упрочнения является радиальная подача  $s$ , т. е. радиальное перемещение зубчатых упрочняющих валков. При постоянных условиях деформирования изменение  $s$  дает возможность изменять в нужную сторону контактные напряжения между зубьями упрочняющего инструмента и упрочняемого колеса.

При прочих равных условиях с увеличением радиальной подачи  $s$  увеличиваются силы нажатия

роликов, а следовательно, и глубина упрочнения  $h$  должна увеличиваться. Повышение скорости вращения упрочняющего колеса  $v$  ведет к небольшому снижению  $h$ .

Для более глубокого изучения характеристики упрочненного пластическим деформированием поверхностного слоя зубьев были определены остаточные напряжения I и II рода, а также диспер-

сность блочной структуры (величина блоков, на которые раздробились кристаллиты) упрочненного металла.

Остаточные напряжения I рода в образцах из натуральных зубьев определялись в основном по известной применяемой методике, заключающейся в постепенном вытравливании поверхностных слоев упрочненного металла и регистрации остающихся при этом деформаций образцов при помощи тензодатчиков и осциллографа с последующим вычислением напряжений по формулам Давиденкова.

В результате установлено, что в поверхностном слое зубьев колес возникают сжимающие остаточные напряжения I рода, равные 90–100 кг/мм<sup>2</sup>. Эти напряжения в значительной степени компенсируют растягивающие напряжения, возникающие от эксплуатационных нагрузок, и тем самым способствуют повышению выносливости зубьев колес передачи. Остаточные напряжения II рода и дисперсность структуры упрочненного слоя металла определялись методом рентгеноструктурного анализа в объеме сравнительной качественной оцен-

ки субмикроструктур зубьев, упрочненных пластическим деформированием при различных режимах. Для этого использовалась обычная рентгеновская установка УРС-50 со счетчиком Гейгера—Мюллера и самопишущим устройством. Источником излучения была рентгеновская трубка БСВ-3 с железным анодом. Полученные данные обрабатывались по известной методике с выполнением соответствующего расчета характеристик дисперсности структуры упрочненного слоя металла образцов с разной глубиной и степенью упрочнения. По рассчитанным величинам относительного уширения интерференционных колец были определены остаточные напряжения II рода [4].

В результате получены данные, показывающие характер изменения величины блоков (дисперсность структуры) и остаточных напряжений II рода (напряжений в микрообъемах) в зависимости от глубины упрочненного слоя.

Из полученных данных следует, что остаточные напряжения II рода возрастают с увеличением глубины упрочнения  $h$  до 2,4 мм, затем их значения остаются примерно постоянными при глубине упрочнения от 2,4 до 2,8 мм, а при дальнейшем увеличении  $h$  они уменьшаются. В субмикроструктуре упрочненного слоя получилось значительное дробление зерен на блоки. С увеличением глубины упрочненного слоя до  $h = 2,9$  мм степень дробления кристаллитов на блоки повышается, а затем при дальнейшем увеличении  $h$  наблюдается снижение степени дробления [4].

Величина блоков упрочненного пластическим деформированием поверхностного слоя металла меньше по сравнению с величиной блоков у неупрочненного термоулучшенного металла во всем диапазоне исследований.

Представленный метод упрочнения не требует длительной и дорогостоящей окончательной обработки зубьев на шлифовальных станках, благодаря чему ликвидируются вызываемые этим процессом дефекты качества поверхности (растягивающие остаточные напряжения, местные перегревы и т. п.), ведущие к снижению выносливости.

Наиболее высокий эффект упрочнения пластическим деформированием рабочих поверхностей зубьев достигается при таком режиме процесса, который обеспечивает глубину упрочненного слоя  $h = 2,9$  мм, повышение твердости на 40—60% при наличии сжимающих остаточных напряжений на

поверхности примерно  $96 \text{ кг/мм}^2$ , величине блоков  $D = 4,1 \cdot 10^{-6}$  мм [4].

Отклонение глубины наклепа от  $h = 2,9$  мм в сторону снижения ведет к уменьшению эффекта упрочнения (к снижению выносливости), а в сторону повышения — к перенаклепу. В качестве ориентировочного режима для промышленного упрочнения, обеспечивающего названные выше характеристики упрочнения, можно рекомендовать полученные данные, а именно скорость вращения упрочняемого колеса  $v = 8—15$  м/мин; осевая подача упрочняющего инструмента должна быть несколько меньше, чем суммарная длина рабочих частей зубьев трех валков; суммарная радиальная подача упрочняющих валков должна быть такой величины, которая создает условную величину контактных напряжений между упрочняемыми и упрочняющими зубьями  $\sigma_k \approx 300 \text{ кг/мм}^2$ ; число проходов желательно иметь минимальное (1—2), а при необходимости увеличения их для доведения точности зубьев следует тщательно проверять физико-механическое состояние металла поверхности, при этом твердость на поверхности не должна быть меньше, чем твердость нижележащих упрочненных слоев, так как это ведет к нарушению сплошности металла несущей поверхности и к снижению выносливости. Процесс пластического деформирования всегда следует вести с обильной смазкой упрочняемых поверхностей металла.

## Выводы

Определены оптимальные режимы упрочнения при глубине упрочненного слоя до 3 мм.

Установлено повышение выносливости несущих поверхностей зубчатых колес в 1,8 раза, увеличение твердости до 40-60%.

Установлена прямо пропорциональная зависимость напряжений II рода от глубины упрочнения.

Выявлено интенсивное дробление блоков микроструктуры при упрочнении до глубины  $h=4$  мм.

## Библиографический список

1. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов. — М.: Металлургиздат, 1961. — 306 с.
2. Иванова В.С., Гордиенко Л.К., Геминев В.Н. Роль дислокаций в упрочнении и разрушении металлов. — М.: Наука, 1965. — 180 с.
3. Зобнин Н.П. Упрочнение деталей машин механическим наклепыванием. — М.: Наука, 1965. — 287 с.

## INVESTIGATION OF POSSIBILITIES TO HARDEN THIN-WALL ELEMENTS OF FLYING VEHICLES BY SURFACE PLASTIC DEFORMATION

**Komkov V.A., Kokoreva O.G., Kursakov A.V.\***

*Moscow Aviation Institute (National Research University),  
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia*

\* e-mail: alexey-kursakov@mail.ru

### Abstract

The paper presents the results of flying vehicles' high-rate thin-walled elements surfaces hardening by surface plastic deformation.

Investigations of mechanical-and-physical properties of metal surface layer at hardening by surface deformation were carried out.

The depth of hardened layer under optimal surface processing rates by hardening with surface plastic deformation.

We establish the relationship between quality characteristic of surface layer with endurance and durability of machine component parts, and performed their quantitative assessment.

Investigations were carried out and positive results were obtained, which allow manufacturing application methods of hardening by plastic deformation for a number of critical parts. These investigations included pilot parts hardening under different modes in laboratory conditions with bench testing and machines with pulsators to compare these parts endurances, as well as under manufacturing conditions with carrying out appropriate comparison performance test of endurance.

**Keywords:** high-rate surfaces of flying vehicles elements, dynamic loads, microstructure, dislocations, hardening, surface' layer quality characteristics, plastic surface deformation, residual stresses, durability.

### References

1. Gubkin S.I. *Plasticheskaya deformatsiya metalla* (Plastic deformation of metals), Moscow, Metallurgizdat, 1961, 306 p.
2. Ivanova V.S., Gordienko L.K., Geminov V.N. *Rol' dislokatsii v uprochnenii razrushenii metallov* (The role of dislocations in metal hardening and fracture), Moscow, Nauka, 1965, 180 p.
3. Zobnin N.P. *Uprochnenie detalei mashin mekhanicheskim naklepyvaniem* (Hardening of machine parts by strain-hardening), Moscow, Nauka, 1965, 287 p.